



TITLE:

Analysis of parametric gaits and control of non-parametric gaits of snake robots(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Ryo, Ariizumi

CITATION:

Ryo, Ariizumi. Analysis of parametric gaits and control of non-parametric gaits of snake robots. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18942>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	有泉 亮
論文題目	Analysis of parametric gaits and control of non-parametric gaits of snake robots （ヘビ型ロボットのパラメトリックな運動の解析およびノンパラメトリックな運動の制御）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>生物のヘビは脚を持たない単純な構造にもかかわらず、多様な運動形態を実現し、様々な環境に適応している。このような特質に着目し、ヘビのような細長い構造を有するヘビ型ロボットの研究が活発になされている。しかし、ヘビ型ロボットは一般的に多くの自由度を有するために、解析や制御が困難である。そこで、解析の視点からは有限個の時不変パラメータを導入することによる、運動空間の次元の低減化がよく用いられる。また、制御の視点からは、受動車輪の影響を速度拘束として定式化することによるモデルの簡略化が広く用いられている。本研究ではパラメータ化された運動の最適化、特に多目的の最適化について論じ、実ロボットの最適化に適用できる多目的最適化手法を提案している。また、制御の観点からは連続曲線近似に基づく推進方向制御、ねじ推進ヘビ型ロボットの先頭追従制御についてそれぞれ論じている。</p> <p>本論文の第 1 章では研究背景として、ヘビ型ロボットの研究を概観し、ヘビの運動のパラメータ化、パラメータの最適化に関する手法、速度拘束式を導入したモデルの簡略化に基づく制御について説明している。</p> <p>第 2 章では、パラメータ化された運動のうち、ほふく推進、サイナスリフティング推進、サイドワインディング推進の 3 つの運動形態について、その移動速度とエネルギー効率の関係を議論している。サイドワインディング推進に関しての力学的な考察は今までほとんどなされてこなかったが、適切なモデル化を提案することにより、これら 3 つの運動形態を同じ枠組みで解析した。これにより、サイドワインディング推進の高速移動時のエネルギー効率の高さなど、生物学の観点からなされてきた主張を裏付ける結果を得た。また、いずれの運動形態においても、速度とエネルギー効率の間にトレードオフが存在することを確認した。</p> <p>第 3 章では、第 2 章での結果を受け、パラメータの多目的最適化を実験的に行う手法を考察している。ヘビ型ロボットの運動を考える際には、パラメータを用途に応じて適切に定める必要があるが、第 2 章で移動速度とエネルギー効率の間にトレードオフが存在することが示されたように、ロボットの最適化においては様々な評価指標間にトレードオフが存在し、すべてを同時に最適化することはできない。また、それぞれの指標に関する重みも用途などに応じて変化するため、評価指標の重みづけ和を最適化することの有効性も明らかではない。そこで、トレードオフの関係を満たす、他のパラメータの組に劣らない解（非劣解）をあらかじめ多数求めておき、状況に応じて最適なものをその中から選択することを考えることになる。ロボットの多目的最適化においては、観測回数の制約やノイズの存在が大きな問題となるが、本研究においては応答曲面法を改良し、広いクラスのノイズに対応しつつ、少ない実験回数で多目的最適化を行う手法を提案している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	有泉 亮
<p>第4章では、連続曲線近似に基づくヘビ型ロボットの進行方向制御について論じている。各リンクに受動車輪を配置したヘビ型ロボットにおいては、受動車輪の効果を、車軸方向に速度を持たないという速度拘束として定式化することが一般的である。このようなロボットにおいてリンク数が十分に多い場合には、その動きは速度拘束の課せられた非伸縮な曲線の流れと考えることができる。本章では微分幾何学に基づいて、速度拘束の課せられた曲線の流れを定式化した。この結果に基づき、特異姿勢を回避しながら進行方向を制御するための、曲率の決定法を提案している。</p> <p>第5章では、ねじ推進ヘビ型ロボットに対し、先頭追従制御を提案している。この制御は、操縦者が先頭リンクの運動を指示すれば後続のリンクが自動的に前方のリンクに追従するというものである。しかし、従来提案されていた先頭追従制御則では曲率変化が大きい場合に大きな追従誤差が生じていた。本論文では、離散的に記録された先頭経路情報を基に経路を推定し、推定された経路への追従誤差を0に収束させるフィードバック制御則を提案している。また、先頭の経路情報を記録する頻度を、経路の曲率に合わせて変更し、経路の推定精度を保証する方法についても論じている。さらに、数値例および実機実験によりその有効性を検証している。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた結論をまとめ、今後の課題について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はヘビ型ロボットを対象に、運動のパラメータ化に基づく解析と、速度拘束による定式化に基づく制御に関する研究の結果についてまとめたものであり、得られた主な結果は次のとおりである。

1. ほふく推進、サイナスリフティング推進、サイドワインディング推進の 3 つの運動形態を同一の枠組みで解析するために、適切な動力学モデルを提案し、シミュレーションにより移動速度とエネルギー効率の関係について論じている。これにより、生物の観察的研究から主張されてきた内容を確認し、また、移動速度とエネルギー効率の間のトレードオフについて明らかにしている。
2. パラメータの多目的最適化を実験に基づいて行うための一般的な方法を提案している。この手法はヘビ型ロボットのみならず、より広いクラスの問題に適用できる一般的な枠組みであり、様々な移動ロボットに対するパラメータの最適化に適用できるものである。また、有効性を数値例および実機実験により検証している。実機実験においては、ヘビ型ロボットのサイドワインディング推進に関して、推進速度の最大化と先頭カメラの安定性最大化の 2 目的最適解を求めている。
3. 車輪拘束ヘビ型ロボットを対象に、その連続曲線近似に基づく運動の定式化を行い、特異姿勢を解析している。また、その結果をもとに、特異姿勢を回避しつつ進行方向を制御するための曲率の決定法を提案し、数値例により検証している。
4. ねじ推進ヘビ型ロボットを対象とする先頭追従制御則について考察し、速度拘束による定式化に基づいて、追従誤差を 0 に収束させるフィードバック制御則を提案している。また、先頭の経路情報を記録する頻度を、経路の曲率に合わせて動的に変更し、経路の推定精度を保証する方法を提案している。制御則の有効性は数値例と実機実験により検証されている。

以上のように本論文は、ヘビ型ロボットのパラメータ化に基づく運動の解析と速度拘束の導入に基づく制御に関して論じたものであり、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。